

シールド掘進時の地盤挙動解析システムとその適用例

— 裏込め注入圧の考慮 —

(株)熊谷組 榎島 幸博 ○千葉 章
同 江口 薫 安川 宏達
同 正員 野口 利雄

1. まえがき

従来、シールド掘進時の地盤挙動解析には、シールド工法特有の覆工セグメントや裏込め注入材等に起因する影響を考慮しない二次元有限要素法による素掘り解析が、比較的多く採用されてきた。この第一の理由として、シールドテールボイド部の取扱い、すなわち掘削面と覆工セグメントの接触問題のモデル化に課題を有するためであった。

最近当社では、「セン断ひずみによる圧密沈下」、「要素重積法による切羽進行の考慮」等、シールド掘進時の地盤挙動解析に関する新しい理論が数多く発表されてきたのを機に、これらの課題を統合した一貫設計システム「STLAP」を開発した。

本報告は、この「STLAP」の特徴と解析手法ならびにその適用結果について、説明するものである。

2. 解析システム

2.1 システムの特徴

本システムは、有限要素法を基本とするシールド掘進時の地盤挙動解析専用システムであり、解析上の特徴が3つ有る。(図-1)

その1は、シールドテールボイド発生時の即時的沈下を防止するために施す裏込め注入を考慮した解析であり施工における裏込め注入の時期、圧力の大きさ等を設定するのに有効となる。

その2は、テールボイド発生時の即時的沈下量に対して、地山の乱れにより生じる後続沈下量を、セン断ひずみによる圧密沈下量として解析し、前記の即時的沈下量に加算する事ができることである。

その3は、本来三次元問題として解析すべきシールド切羽の進行に伴う地盤の挙動を、二次元の平面ひずみ問題として取扱い、近似的にこれを解析する「要素重積法」である。

以上の機能により、施工要因を加味したシールド掘進時の地盤挙動解析を行う事ができる。

2.2 解析手法

本システムでは、線形弾性材料による線形解析と弾塑性材料(Drucker-Prager)による非線形解析が行え、非線形解析の手法として、荷重増分法と修正荷重漸増法が用意されている。また、バンド巾縮小の手法として、Cuthill & Mckee法、連立一次方程式の解法として、スカイライン法を採用している。なお掘削相当外力の算定に際し自重も考慮している。

以下、セグメント、裏込め注入を考慮した場合の弾塑性解析(図-2)の内の、シールドテールボイド要素の裏返り処理と掘削により乱れた地山の圧密沈下計算の解析手法について説明する。

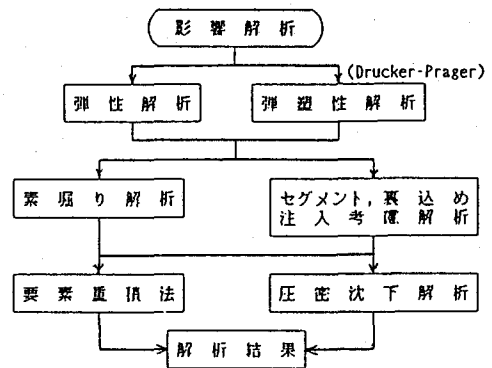


図-1 システムフロー

2.2.1 テールボイド要素の裏返り処理

変形係数の小さい軟弱地盤等の解析において、地山とセグメントの接触問題を解析しようとした場合、裏込め注入を施す（テールボイド要素の材質変更）以前では、計算の精度上どうしても地山要素とセグメント要素がラップ（裏返り）する現象を生じ易い。（図-3）そこで、本プログラムではこの現象を防止するため、各荷重増分ステップ毎に、トンネル周辺の地山とセグメントの変位量を算出し、裏返りのチェックを行う。ここで裏返りする要素があれば、その要素の材質（E, ν ）を地山の材質に自動的に置換（但し、これ以後裏込め注入による材質変更指示があれば、これと置換し直す）し、再度このステップの解析をし直す手法を採っている。

以上の処理により、見掛け上圧縮されたテールボイド要素を介し、荷重がセグメントに伝達され、以後地山の変形はセグメントの弾性変形に依存する事になり、現実に近い解が得られる事になる。

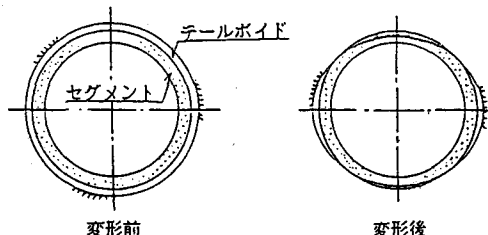


図-3 要素の裏返り現象

2.2.2 圧密沈下計算

本プログラムでは、森、赤木らが提案した「セン断ひずみによる圧密沈下計算」の手法を応用している。

この手法は、予め圧密沈下に関与する要素を推定しておき（データ入力）、その推定要素から上方45°の領域の中に含まれる節点の圧密沈下量を、掘削解析終了後のセン断ひずみを用いて計算するものである。（図-4, 5）

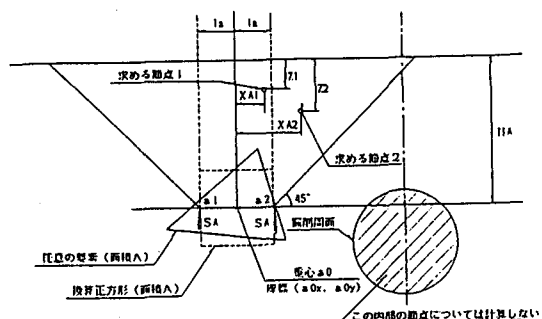


図-4 圧密計算概念図

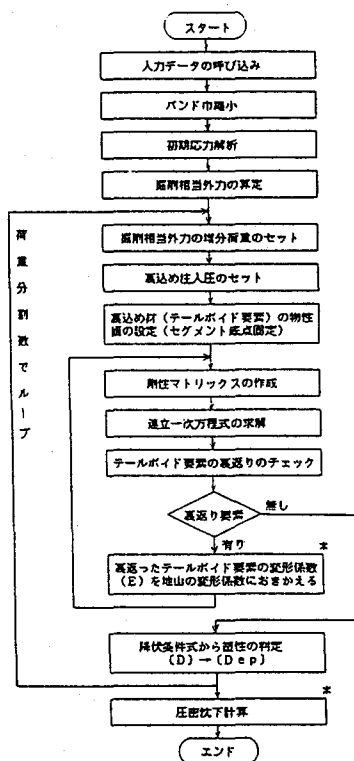


図-2 セグメント・裏込め注入を考慮した弾塑性解析（荷重増分法）

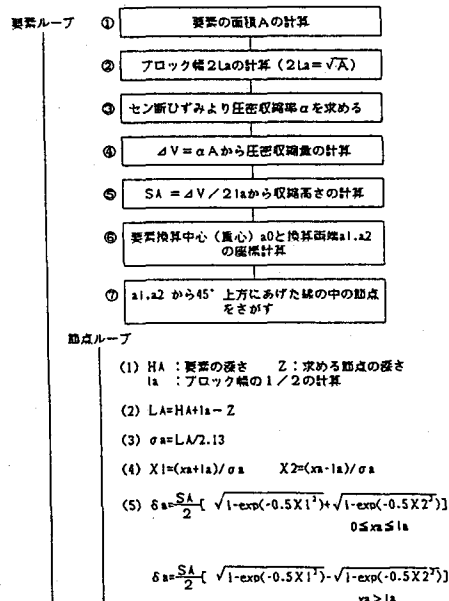


図-5 圧密計算フロー

3. 適用例

実際のシールド掘進についての解折適用例として、沈下測定が行なわれている次の2現場を考えた。工事概要を表-1に示す。

3. 1 土質及び測定位置

Tシールドの測定場所の土質は、主として砂質土であり、掘削断面付近に一部粘性土が存在する。(図-6) 地表面沈下測定点は3点でありレベルにより測定した。裏込め注入圧は0, 0.1 ~ 0.2, 0.3MPaの3種類に変化させた。(図-7)

Sシールドの測定場所の土質は、主としてシルトである。(図-8) 当該工事では測定断面に層別沈下計傾斜計を使用し、その断面と前後の点で地表面変位をレベルにより測定した。(図-9, 10) 裏込め注入圧は0.35~0.39MPaの範囲で変化させた。(測定点は代表的なもののみを示す)

表-1 工事概要

	Tシールド	Sシールド
1. 掘削外径 (m)	3.08	6.14
2. セグメント外径 (m)	2.95	6.00
3. 掘削方式	泥土圧式	土圧式
4. 平均土被り (m)	9.0	7.5
5. 土質概要	砂 (N≒10)	シルト (N≒3)
6. 裏込め注入方法	即時注入	即時注入

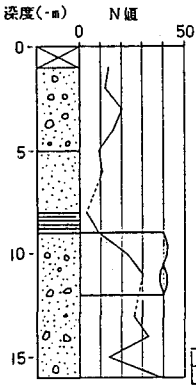


図-6 T土質

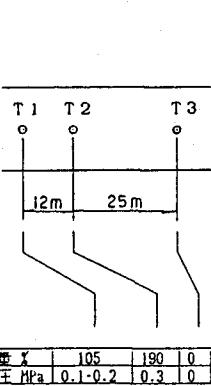


図-7 測定位置

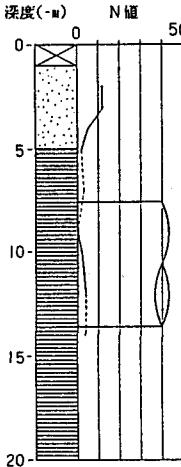


図-8 S土質

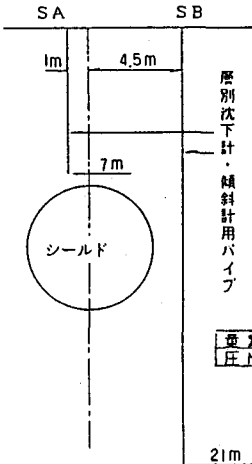


図-9 変位計

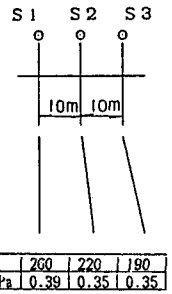


図-10 測定位置

3. 2 沈下測定結果

TシールドについてはT1, T2, T3の沈下量を図-11に示す。SシールドについてはS1, S2, S3の沈下量を図-12に、SA, SBの水平変位(最終値)を図-13に示す。

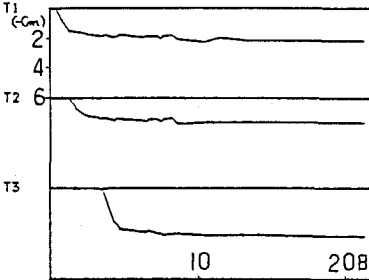


図-11 Tシールド沈下量

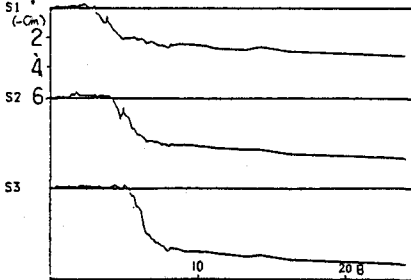


図-12 Sシールド沈下量

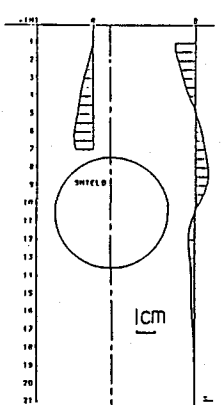


図-13 Sシールド水平変位

3. 3 測定結果の解析

解析は前述の「STLAP」を使用し、応力解放率は0.1×10とした。裏込め注入圧を載荷する応力解放率は、一般的な内空変位曲線を応力解放率とみなし、載荷ステップを決定する。(図-14, 表-2) なおdは即時注入のため、セグ

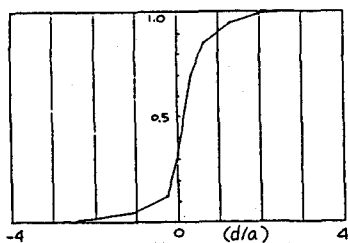


図-14 内空変位曲線

表-2 応力解放率

	d(m)	a(m)	d/a	解放率
Tシールド	0.9	3.08	0.30	0.7
Sシールド	0.9	6.14	0.15	0.5

d: セグメント幅 (m)
a: シールド外径 (m)

表-3 裏込め載荷圧 (MPa)

	ゲージ圧	土被り圧	載荷圧
T1	0.1-0.2	0.16	0
T2	0.30	0.16	0.07
T3	0	0.16	0
S1	0.39	0.14	0.06
S3	0.35	0.14	0.03

V: テールボイド沈下
G: 裏込め注入後沈下
C: 圧密による後続沈下

表-4 地表面中央部沈下量の対比 (mm)

	T3			T1			T2			S1			S2			S3		
	V	C	G	V	C	G	V	C	G	V	C	G	V	C	G	V	C	G
実測値	29	31	15	19	21	11	15	16	19	25	35	26	31	44	30	40	56	
計算値	27	29	15	19	20	11	16	18	19	29	38	..	..	..	27	36	46	

メント1リング分とする。裏込め注入圧は、今回の測定ではすべてゲージ圧である。ゲージ圧と実際地山に載荷される圧力は、配管抵抗、注入時の土水圧とのバランスの関係で差があると思われるが、今回は沈下挙動の実測値に近づくように計算上の載荷圧を決定した。(表-3)入力データと解析結果(変位図)の一部を図-15, 16に示す。また解析結果(数値)と実測値との対比を表-4に示す。

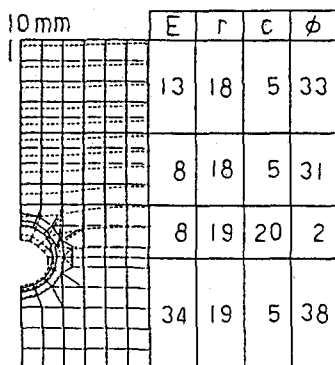


図-15 T入力データ, 変位

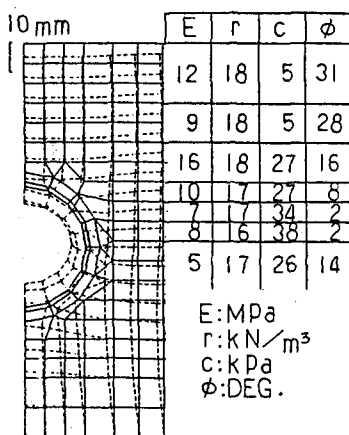


図-16 S入力データ, 変位

4. 考察

解析を行なって以下の事柄が判明した。

- ① 裏込め注入率0の場合は地表面沈下に対し、弾塑性計算が比較的よく一致する。
- ② 裏込め注入率が0以外の場合でも、注入圧と注入材剛性を適当に考慮することにより、沈下に対する施工要因を表現できる。(表-4)
- ③ 地表面沈下が実測値と対応するように計算上の裏込め注入圧を低減させると、地中水平変位が実測値と一致しない。(図-13, 15)
- ④ ③で行なった注入圧の低減率は8~25%程度であるが定量的な評価はできていない。(表-3)
- ⑤ 圧密による後続沈下の計算値は実測値と比較的よい一致を示す。(図-11, 12)

今後は特に有効裏込め注入圧, 注入量, 圧密による後続沈下に注目し、計算値と実測値の対比を行なっていく予定である。

参考文献

- | | | | |
|------------|-------------------------|---------------|---------|
| 森, 赤木, 金沢 | 軟弱粘性土地盤の最適裏込め注入量 | トンネルと地下 | 1984/12 |
| 大西, 岸本 | トンネル切羽進行の影響を近似的に考慮した…… | トンネルと地下 | 1980/12 |
| 吉沢, 島津, 細田 | 軟弱粘性土地盤での裏込め注入効果と地盤沈下…… | 29回土質工学シンポジウム | |
| 野口, 山本 | 裏込め注入量を変化させたシールドトンネルの…… | 41回土木学会年講 | |